

論文内容の要旨

気体中のオルソポジトロニウムの 2光子消滅過程の研究

東京大学大学院理学研究科物理学専攻

篠原 紀幸

最近、カリフォルニア大学 (San Diego) の Surko らのグループが、ペニングトラップ中に蓄えた熱化陽電子を使って、気体中の陽電子の消滅率 λ_+ の系統的測定を行った [1,2]。彼らは、Fraser が導入した次の関係式 [3] を使って、求めた λ_+ を陽電子消滅パラメータ Z_{eff} で整理した。

$$\lambda_+ \equiv \pi r_0^2 cn Z_{\text{eff}} \quad (1)$$

ここで r_0 は古典電子半径、 c は光の速さ、 n は試料気体の数密度である。

その結果、 Z_{eff} は、 $1 \sim 10^7$ という広い範囲の値をとること、特に有機分子において異常に大きな値をとることが明らかになった。

気体中の熱化ポジトロニウム (Ps) の 2 光子消滅過程でも、 Z_{eff} とよく似たパラメータが定義される。オルソポジトロニウム (o-Ps) のピックオフ消滅に対して、Fraser が導入した ${}^1Z_{\text{eff}}$ である。それは、ピックオフ消滅率 λ_{pickoff} と

$$\lambda_{\text{pickoff}} \equiv 4\pi r_0^2 cn {}^1Z_{\text{eff}} \quad (2)$$

で関係づけられ、ピックオフ消滅に関与する、分子あたりの有効電子数と解釈される。

${}^1Z_{\text{eff}}$ の値は、 N_2O と O_2 を除くと、 $0.1 \sim 1$ 程度 [4] とされており、分子によって大きく変化する Z_{eff} とは対照的である。しかしながら、従来の測定は Surko らの Z_{eff} 測定のように多くの気体について系統的に行われたというのではなく、グループによって測定条件がまちまちであり、値にばらつきがあった。

N_2O は反磁性気体であるため、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ は他の反磁性気体と同程度のものであると考えられていた。しかし、その値は予想に反し、他よりも大きいものであった [5]。 O_2 は常磁性気体であるため、o-Ps の 2 光子消滅過程にはピックオフ消滅の他に、スピン転換消滅がある。従来の O_2 の ${}^1Z_{\text{eff}}$ はこれらの全 2 光子消滅率に対して求められたものである [4]。それゆえ、ピックオフ消滅率から求められる、本来の ${}^1Z_{\text{eff}}$ は測定されていない。

また、理論的研究は今まで、ほとんど行われなかった。

こうしたことから、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ が本当に 0.1 ~ 1 程度のものなのか確認する必要がある。多くの気体の ${}^1Z_{\text{eff}}$ をまとめて測定し信頼できる値を提示することができれば、それを基に Ps-分子相互作用の理論的研究が行われるものと期待される。

そこで、本研究では、さまざまな気体の ${}^1Z_{\text{eff}}$ の値を確認するために 2 種類の実験を行った。いずれもシリカエアロゲルで生成した Ps を利用した。

実験 (1) さまざまな気体に対する ${}^1Z_{\text{eff}}$ の系統的測定

同一の装置でほとんど同一の測定条件で、異常な値が報告されている N_2O を含めた 17 種類の試料気体の ${}^1Z_{\text{eff}}$ を測定した。

試料気体が存在する時の o-Ps の全消滅率と、存在しない時の全消滅率を、陽電子寿命測定法によって測定した。これらの差を試料気体によるピックオフ消滅によるものとして、式 (2) にしたがって、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ を求めた。このときシリカエアロゲル表面に吸着した分子によるピックオフ消滅の効果の補正を行った。

実験 (2) 常磁性気体 O_2 中の o-Ps の 2 光子消滅過程の研究

O_2 中の o-Ps の 2 光子消滅過程にはピックオフ消滅の他に、スピン転換消滅がある。本研究ではこれらを分離するため、陽電子消滅寿命運動量相関法 (AMOC) を用いた。これは陽電子電子対の消滅時の重心運動量分布を陽電子寿命の関数として求めるものである。熱化 o-Ps だけが存在する時間領域での 2 光子消滅過程には、o-Ps のピックオフ消滅とスピン転換過程によって o-Ps から変換された p-Ps の自己消滅しかない。スペクトルに現れるこれらの成分を分離して、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ と弾性的スピン転換断面積 σ_{spin} を求めた。

その結果、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ の大きさが測定したすべての気体について 0.1 ~ 1 程度であることを確認することができた。 N_2O と O_2 の ${}^1Z_{\text{eff}}$ もまた他の気体と同じ程度であることがわかった。過去の N_2O の値は、医療用の O_2 と混合した笑気ガスを誤って使用したものと思われる。 O_2 との衝突による o-Ps の弾性的スピン転換断面積の値は $\sigma_{\text{spin}} = (1.16 \pm 0.02) \times 10^{-19} \text{cm}^2$ である。

表 1 は、本研究で求めた ${}^1Z_{\text{eff}}$ を従来の測定結果と比較したものである。 O_2 の値は実験 (2) で求めたものである。

これまでに報告がある気体について過去の値と比較すると、よく似た値である。それゆえ、従来の値も誤りではない。

次に ${}^1Z_{\text{eff}}$ を Z_{eff} と比較したものを図 1 に示す。分子を特徴づけるパラメータとして、文献 [2] と同じく $\alpha/(E_i - E_{\text{Ps}})$ を使った。 α は気体の分極率、 E_i は気体のイオン化エネルギー、 E_{Ps} は Ps の束縛エネルギーで 6.8 eV である。

Z_{eff} が分子に対して大きく変化するのに対して、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ はほとんど変化しない。しかしよく見ると、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ も分子に対し増加傾向を示すことがわかる。そこで ${}^1Z_{\text{eff}}$ の部分だけを取り出して図 2 に示した。なお、誤差も示した。スピン転換反応が競合している O_2 の誤差は極端に大きい。また、有機分子の誤差が大きいのは、吸着の補正の影響があるからである。

Gas	this exp.	previous
He	0.126 ± 0.006	0.125 ± 0.002
Ne	0.267 ± 0.007	0.235 ± 0.008
Ar	0.394 ± 0.007	0.314 ± 0.003
Kr	0.511 ± 0.010	0.478 ± 0.003
Xe	1.253 ± 0.018	1.26 ± 0.01
H ₂	0.194 ± 0.007	0.186 ± 0.001
N ₂	0.274 ± 0.009	0.260 ± 0.005
CO ₂	0.497 ± 0.016	0.500 ± 0.001
SF ₆	0.473 ± 0.012	0.52
CO	0.309 ± 0.007	0.285 ± 0.010
N ₂ O	0.453 ± 0.015	11
O ₂	0.6 ± 0.6	44 ± 3
CH ₄	0.470 ± 0.007	0.446 ± 0.001
C ₂ H ₆	0.583 ± 0.011	0.625 ± 0.020
<i>n</i> - C ₄ H ₁₀	0.714 ± 0.050	0.772 ± 0.009
<i>iso</i> - C ₄ H ₁₀	0.694 ± 0.049	0.729 ± 0.002
<i>iso</i> - C ₅ H ₁₂	0.749 ± 0.106	—
<i>neo</i> - C ₅ H ₁₂	0.738 ± 0.079	—

表 1: 従来の結果との比較。—は過去に測定が行われていないことを示す。

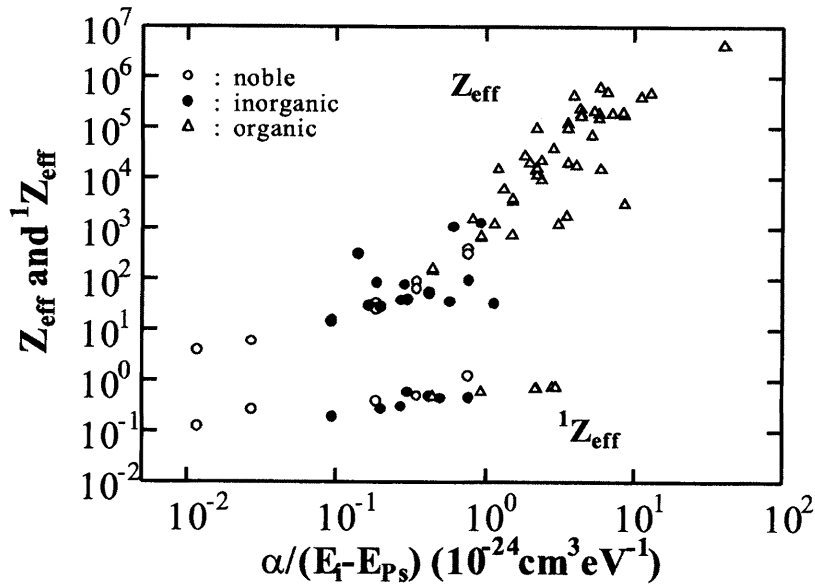


図 1: ${}^1Z_{\text{eff}}$ と Z_{eff} の比較

Xe の ${}^1Z_{\text{eff}}$ が非常に大きな値を示し、他の分子の傾向から外れていることもわかる。

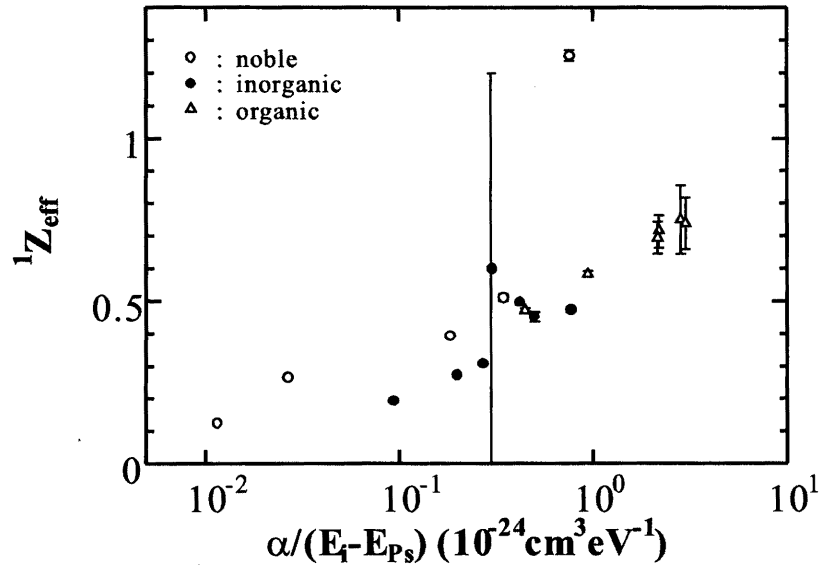


図 2: ${}^1Z_{\text{eff}}$ の分子依存性

Xe を含め、 ${}^1Z_{\text{eff}}$ の分子依存性の詳細については全く不明である。いまのところ、このような ${}^1Z_{\text{eff}}$ の分子依存性を説明するモデルはなく、将来の理論的研究が望まれる。

[参考文献]

- [1] K. Iwata, R.G. Greaves, T.J. Murphy, M.D. Tinkle, and C.M. Surko, Phys. Rev. **A51**, 473, (1995), and references therein.
- [2] K. Iwata, G.F. Gribakin, R.G. Greaves, C. Kurz, and C.M. Surko, Phys. Rev. **A61**, 022719, (2000).
- [3] P.A. Fraser, Adv. At. Mol. Phys. **28**, 308, (1968).
- [4] 例えば M. Charlton, Rep. Prog. Phys. **48**, 737, (1985).
- [5] P.E. Osmon, Phys. Rev. **140**, A8, (1965).